

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до проведення практичних занять  
та виконання самостійної роботи

з дисципліни

**«СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ»**

*(для студентів 3 і 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки  
0922 (6.050702) «Електромеханіка» спеціальності  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)*

**Харків**  
**ХНАМГ**  
**2011**

Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання самостійної роботи з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 0922 (6.050702) «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: М. І. Шпіка. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 51 с.

Укладач: М. І. Шпіка

Рецензент: доц. В. П. Андрійченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,  
протокол № 3 від 19 жовтня 2010 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ .....	4
1. Функціональні схеми автоматичних систем .....	5
2. Статичні властивості автоматичних систем та їх оцінка .....	7
3. Динамічні властивості автоматичних систем та їх оцінка .....	10
4. Аналіз типових вузлів автоматичних систем .....	12
5. Оцінки якості перехідних процесів в автоматичних системах керування ...	19
6. Обчислення похибок автоматичної системи від органів керування .....	22
7. Корекція автоматичних систем .....	24
8. Структура багаторівневої системи керування та її складові .....	27
9. Мікропроцесорні системи керування асинхронного електроприводу .....	34
9.1. Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування .....	35
9.2. Структура мікропроцесорної системи керування асинхронного електроприводу .....	39
9.3. Елементи мікропроцесорної системи керування .....	41
10. Цифрові канали зв'язку .....	46
11. Протоколи обміну .....	49
Список джерел .....	50

## Вступ

Останні десятиліття ознаменувалися значними успіхами в галузі силової електроніки та мікропроцесорної техніки. Було освоєно промислове виробництво біполярних транзисторів (IGBT) з ізолюваним затвором та силових модулів на їхній основі, а також силових інтелектуальних модулів (IPM) з вбудованими засобами захисту ключів та інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування.

Ріст ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці й перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів з вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв, зробили необоротною тенденцію масової заміни аналогових систем керування електроприводами на системи прямого цифрового керування.

В економічно розвинених країнах міський електротранспорт та підприємства житлово-комунального господарства (ліфтові служби, водопостачання тощо) практично повністю перейшли на частотно-регульований асинхронний електропривод. Це викликано прагненням знизити питомі енерговитрати і експлуатаційні витрати, підвищити надійність електропривода, збільшити термін служби електроустаткування і поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу.

Використання мікропроцесорної системи керування (МПСК) розширяє функціональні можливості електропривода, поліпшує його статичні й динамічні характеристики за рахунок реалізації оптимальних законів і алгоритмів широтно-імпульсного керування інвертором.

МПСК забезпечує частотний пуск, роботу й гальмування електропривода за заданим алгоритмом.

Задані характеристики електроприводу підтримуються мікропроцесорною системою керування протягом усього терміну роботи, а за необхідності можуть корегуватися шляхом вдосконалення алгоритмів керування на програмному рівні. Це дозволяє, не змінюючи структури системи керування, підвищувати її ефективність, а в кінцевому рахунку – збільшити термін роботи електрообладнання та знизити експлуатаційні затрати. Крім того, використання мікропроцесорної системи керування забезпечує ефективну систему діагностики електроприводу. З'являється можливість записувати процеси, що протікають у силовій частині електропривода й системі керування, з подальшим відтворенням їх на екрані монітора персонального комп'ютера.

## 1. Функціональні схеми автоматичних систем

Серед різних автоматичних систем найбільшого поширення набули системи, в яких реалізований принцип керування за відхиленням. Для пояснення принципу дії автоматичних систем застосовують функціональні схеми. Функціональна схема складається з функціональних блоків, які є конструктивно відособленими елементами автоматичних систем, що виконують певні функції. Функціональні блоки на схемі позначаються прямокутниками, усередині яких надписують їх найменування відповідно до виконуваних функцій. Зв'язки між функціональними блоками позначаються лініями із стрілками, які вказують напрям дій.

Розглянемо функціональну схему автоматичної системи, приведену на рис. 1.1, яка складається з об'єкту регулювання (ОР), регулятора та задаючого пристрою (ЗП).

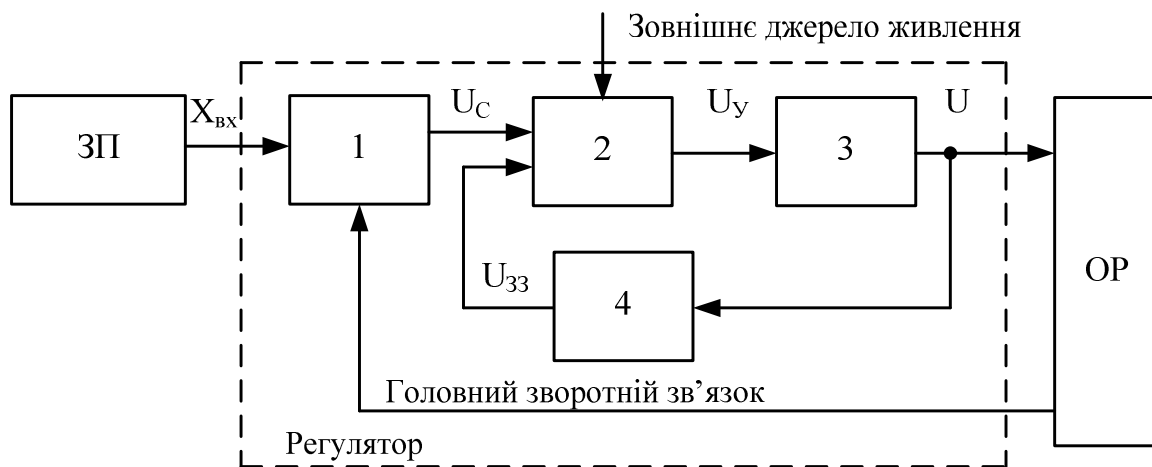


Рис. 1.1 – Функціональна схема автоматичної системи

У цій системі функціонально необхідними елементами, за допомогою яких реалізується принцип керування за відхиленням, є об'єкт регулювання ОР, вимірювальний 1, підсилювальний 2 і виконавчий 4 пристрої задаючий пристрій та головний зворотний зв'язок.

Вимірювальний пристрій виробляє сигнал  $U_c$ , пропорційний відхиленню  $\Delta x$  регульованої величини  $X_{вих}$  від необхідного значення  $X_{вх}$ :

$$U_c = k_c (x_{вх} - x_{вих}) = k_c \Delta x, \quad (1.1)$$

де  $k_c$  — коефіцієнт передачі вимірювального пристрою.

Необхідне значення регульованої величини виробляється в задаючому пристрої ЗП. Задаючий пристрій може входити до складу регулятора і бути частиною вимірювального пристрою а може знаходитися на значній відстані від автоматичної системи і бути пов'язаним з нею дистанційно. Підсилювальний пристрій підсилює сигнал помилки до величини  $U_y$ , яка достатня для керування виконавчим пристроєм. Посилення сигналу помилки відбувається за рахунок енергії зовнішнього джерела. У простих системах, де сигнал помилки має достатню потужність, підсилювального пристрою може не бути. Однак у таких систем, які називають системами прямого регулювання, обмежене застосування через недостатню точність.

Виконавчий пристрій виробляє сигнал  $U$ , який через регулюючий орган прикладається до об'єкту регулювання, щоб звести до нуля неузгодження.

Для поліпшення динамічних властивостей системи, окрім розглянутих функціонально необхідних елементів, вводяться корегуючі пристрої, які залежно від місця включення бувають послідовними і паралельними. Послідовний корегуючий пристрій включають до ланцюга сигналу похибки між окремими каскадами підсилювача, а паралельний 4 виконується у вигляді місцевих зворотних зв'язків, якими охоплюються найбільш інерційні елементи. У одній автоматичній системі може бути або послідовний, або паралельний корегуючий пристрій, або обидва одночасно.

### Контрольні запитання

1. Для чого призначені функціональні схеми?
2. Що таке вимірювальний пристрій?
3. Для чого призначений підсилювальний пристрій?

4. Для чого призначений виконавчий пристрій?
5. Для чого призначений задаючий пристрій?
6. Що таке корегуючий пристрій?
7. Для чого призначений головний зворотній зв'язок?

## 2. Статичні властивості автоматичних систем та їх оцінка

Статичні властивості автоматичної системи оцінюють за статичною характеристикою, якою називається залежність сталого значення керованої величини від збурення. Якщо стале значення помилки в системі залежить від сталого значення збурення, то система називається статичною (рис. 2.1), а якщо не залежить – то астатичною (рис. 2.2).

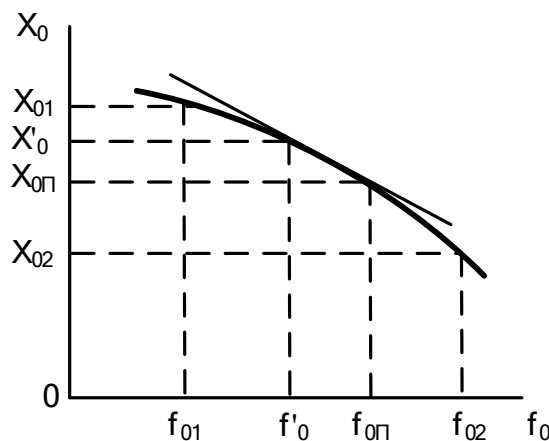


Рис. 2.1 – Статична характеристика статичної системи

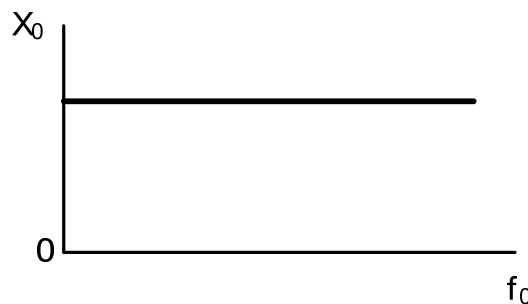


Рис. 2.2 – Статична характеристика астатичної системи

Статичні властивості системи оцінюються кількома показниками. Один із них – це абсолютне значення статичної похибки (рис. 2.1), яке дорівнює:

$$\Delta x = |x'_0 - x_{0n}|, \quad (2.1)$$

де  $x'_0$  – стале значення керованої величини при даному значенні збурення  $f'_0$ ;  $x_{0n}$  – номінальне значення керованої величини.

Якщо номінальне значення керованої величини рівне середньоарифметичному від її максимального і мінімального значень, то:

$$x_{0n} = \frac{x_{01} + x_{02}}{2}, \quad (2.2)$$

а максимальне значення похибки:

$$\Delta x_{\max} = |x_{01} - x_{0n}| = |x_{02} - x_{0n}|. \quad (2.3)$$

Другий показник – це відносна статична похибка, або статизм системи:

$$S = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{0n}} = \frac{2\Delta x_{\max}}{x_{0n}}, \quad (2.4)$$

який можна характеризувати коефіцієнтом статизму, рівним тангенсу кута нахилу статичної характеристики (рис. 2.1):

$$\chi = \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.5)$$

Якщо система лінійна, то її статична характеристика також буде лінійною. Для такої системи:

$$\lambda = \frac{x_{02} - x_{01}}{f_{02} - f_{01}}. \quad (2.6)$$

Для нелінійної системи коефіцієнт статизму визначається для кожного збурення, як тангенс кута нахилу дотичної до статичної характеристики ,



відповідної даному значенню збурення (рис. 2.1), і називається місцевим коефіцієнтом статизму.

Ефективність автоматичної системи в сталому режимі оцінюють так званим ступенем точності – відношенням абсолютної статичної помилки неавтоматизованого об'єкта керування (без регулятора) до абсолютної статичної помилки автоматичної системи (рис. 2.3):

$$S = \frac{\Delta x_H}{\Delta x} . \quad (2.7)$$

Очевидно, що чим вищий ступінь точності, тим більша ефективність автоматичної системи в сталому режимі.

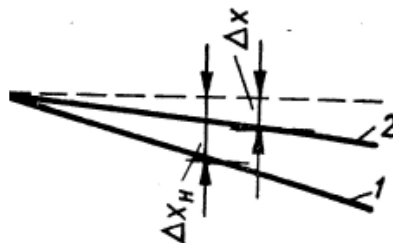


Рис. 2.3 – Статичні характеристики відповідно неавтоматизованого об'єкта керування (1) і автоматичної системи (2)

Для астатичної системи абсолютне значення статичної похибки і коефіцієнт статизму рівні нулю, а ступінь точності — нескінченність.

### Контрольні запитання

1. Як оцінюють статичні властивості автоматичної системи?
2. Яка автоматична система називається астатичною?
3. Яка автоматична система називається статичною?
4. Що таке абсолютне значення статичної похибки?
5. Що таке відносна статична похибка?
6. Що таке коефіцієнт статизму?
7. Чому дорівнює коефіцієнт статизму астатичної системи?
8. Яка ступінь точності астатичної системи?

### 3. Динамічні властивості автоматичних систем та їх оцінка

Для того, щоб оцінити динамічні властивості автоматичної системи, слід вирішати диференціальне рівняння системи і проаналізувати знайдене рішення. Рішення одного і того самого рівняння буде різним при різних формах вхідного збурення. Тому спочатку необхідно вирішити, яку форму вхідного збурення доцільно вибрати. Ця дія має відповідати найбільш важкому режиму роботи системи з числа тих, що зустрічаються при її експлуатації. В той же час, дія має бути достатньо простою, щоб не утрудняти рішення диференціального рівняння. Цим умовам задовольняють дії двох форм: одинична ступінчаста функція і одиничний імпульс. Тому для оцінки динаміки систем застосовують перехідну функцію (як реакцію системи на одиничний стрибок) та імпульсну перехідну функцію (як реакцію системи на одиничний імпульс). Перехідну й імпульсну перехідну функції одержують, вирішуючи диференціальне рівняння з нульовими початковими умовами для випадків, коли вхідна величина є одиничним стрибком і одиничним імпульсом.

Це робиться для того, щоб однозначно оцінювати різні системи, оскільки на імпульси різної інтенсивності навіть одна і та сама система реагуватиме по-різному. З цієї ж причини вибираються однакові нульові початкові умови. Крім того, використання стрибка або імпульсу як стандартного збурюючого сигналу має ще й ту перевагу, що через ці сигнали можна виразити безперервні сигнали будь-якої форми. Наприклад, якщо на вхід системи діє сигнал  $f(t)$ , то його можна представити у вигляді суми стрибків 1, 2, 3, 4 або суми імпульсів 1, 2, 3, ..., 10 певної інтенсивності, які подаються в певні моменти часу  $0, t_1, t_2$  і  $t_3$  (рис. 3.1) або через рівні проміжки часу  $\Delta t$  (рис. 3.2).

Знайшовши реакцію системи на кожен стрибок або імпульс і підсумувавши результат, одержимо реакцію системи на сумарний вхідний сигнал  $f(t)$ .

Для оцінки динаміки систем може служити також операційне рівняння, з якого виходить передавальна функція – відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної величини системи.

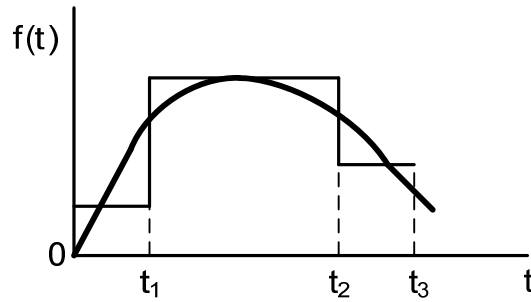


Рис. 3.1 – Часова діаграма розкладання сигналу  $f(t)$  довільної форми на скачки

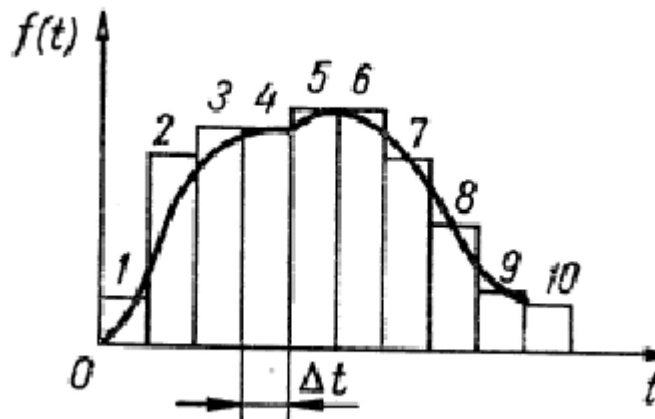


Рис. 3.2 – Часова діаграма розкладання сигналу  $f(t)$  довільної форми на імпульси

Якщо, наприклад, операційне рівняння має вигляд:

$$(a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)x(p) = (b_1 p + b_0)f(p), \quad (3.1)$$

то передавальна функція системи дорівнює:

$$\Phi(p) = \frac{x(p)}{f(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3.2)$$

Передавальну функцію системи можна легко обчислити також по передавальних функціях її окремих елементів. На практиці не має сенсу аналізувати або записувати диференціальне рівняння розімкненої системи. А передавальну функцію розімкненої системи використовують досить широко. Якщо в структурній схемі системи елементи включені послідовно, то передавальна функція розімкненої системи  $W(p)$  рівна добутку передавальних

функцій послідовно включених елементів і є відношенням двох поліномів від  $p$ , причому в реальних системах порядок поліному чисельника не може бути вищий від порядку поліному знаменника. За передавальною функцією системи можна визначити статичні якості системи. Для оцінки динамічних якостей потрібні додаткові дослідження самої передавальної функції.

### **Контрольні запитання**

1. Яким чином можна оцінити динамічні властивості автоматичної системи?
2. Яку форму вхідного збурення доцільно вибрати при оцінці динамічних властивостей автоматичної системи?
3. Що таке одинична ступінчаста функція?
4. Для чого використовується одиничний імпульс?
5. Для чого використовується перехідна функція?
6. Де використовують імпульсну перехідну функцію?

### **4. Аналіз типових вузлів автоматичних систем**

Проаналізуємо типові вузли автоматичних систем з точки зору їх динамічних властивостей.

Динамічною ланкою, або просто ланкою, називається елемент або вузол автоматичної системи, який має певні динамічні властивості. Розглянемо, наприклад, схеми електричного ланцюга і механічної системи, приведені на рис. 4.1.

Електричний ланцюг (рис. 4.1а) складається з резистора  $R$ , конденсатора  $C$  та індуктивності  $L$ .

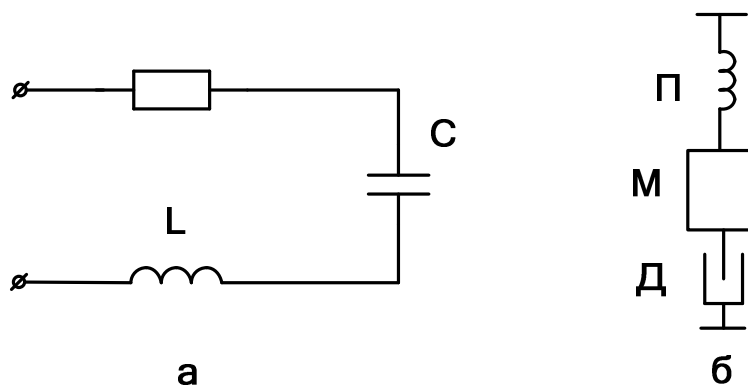


Рис. 4.1 – Схеми електричного ланцюга (а) і механічної системи (б)

За наявності зовнішньої напруги динамічні процеси в електричному ланцюзі описуються диференціальним рівнянням другого порядку:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = U, \quad (4.1)$$

де  $q$  – заряд конденсатора  $C$ .

Механічна система (рис. 4.1б) складається з твердого тіла  $M$ , пружини  $\Pi$  та демпфера  $Д$ , і за наявності зовнішньої сили  $f$  диференціальне рівняння динаміки механічної системи має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + cx = f, \quad (4.2)$$

де  $x$  – переміщення тіла  $M$ ;

$m$  – маса тіла  $M$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт сили демпфера  $Д$ ;

$c$  – коефіцієнт жорсткості пружини  $\Pi$ .

Таким чином, рівняння динаміки електричного ланцюга і механічної системи є однотипними. З цього можна зробити висновок, що динамічні процеси в обох системах, незважаючи на різну їх фізичну природу, є подібними. Іншими словами, електричний ланцюг і механічна система є ланками одного типу.

Виявляється, що незважаючи на велику різноманітність елементів, які розрізняються між собою за фізичною природою, конструктивним оформленням, потужністю, видом споживаної енергії і т. д., можна виділити всього декілька типових ланок: пропорційні (підсилювальні), аперіодичні (інерційні), коливальні, інтегруючі, диференціюючі й форсуючі.

Оцінимо динамічні властивості пропорційної ланки по реакції ланки на вхідний сигнал типу одиничної ступінчастої функції. Якщо, наприклад, на вхід дільника напруги (рис. 4.2) раптово подати постійну напругу  $U_{вх}$ , величину якої умовно приймемо за одиницю, то одразу ж з'явиться й вихідна напруга  $U_{вих}$ .

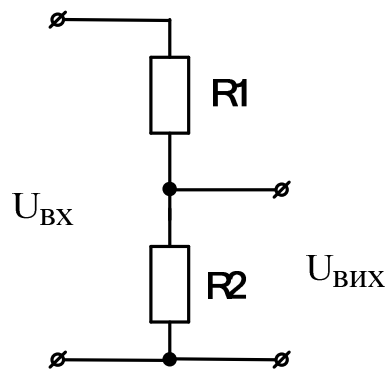


Рис. 4.2 – Схема дільника напруги

Її величина буде в  $k_d$  разів відрізнятись від величини вхідної напруги:

$$U_{вих} = k_d U_{вх}, \quad (4.3)$$

$$\text{де } k_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1.$$

Таким чином, пропорційна ланка миттєво копіює вхідний сигнал, змінюючи його масштаб в  $k$  разів. Перехідного процесу немає. Отже, пропорційна ланка є безінерційною.

Аперіодична ланка описується диференціальним рівнянням:

$$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = k x_{\text{вх}}, \quad (4.4)$$

де  $T$  – постійна часу;

$k$  – коефіцієнт передачі.

Передавальна функція аперіодичної ланки має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (4.5)$$

Перехідна функція аперіодичної ланки досягає свого сталого значення  $k$  не одразу, а поступово, по експоненціальному (аперіодичному) закону (рис. 4.3), через що ланка і одержала своє найменування.

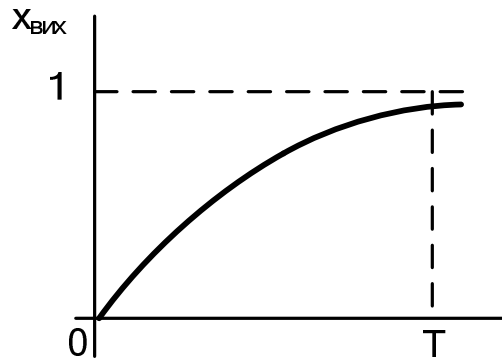


Рис. 4.3 – Перехідна функція аперіодичної ланки

Аперіодична ланка відображає інерційність процесу, причому мірою інерційності є постійна часу  $T$ . Перехідний процес закінчується при  $t = (3 - 4)T$ . Що менше  $T$ , то аперіодична ланка ближче по своїх динамічних властивостях до пропорційної.

Елемент автоматичної системи може бути відображений аперіодичною ланкою, якщо він містить хоча б один накопичувач енергії. Такими накопичувачами в електричних ланцюгах є конденсатор  $C$  й індуктивність  $L$ . В конденсаторі накопичується енергія електричного поля, а в індуктивності – магнітного.

Елемент автоматичної системи може бути відображений коливальною ланкою, якщо він містить як мінімум два накопичувачі різних видів енергії: в одному накопичується потенційна енергія, а в іншому – кінетична. Канал, по якому накопичувачі обмінюються енергією, має опір. На ньому відбуваються безповоротні втрати енергії. Мірою цих втрат є коефіцієнт  $\xi$ , який чим більший, тим більші втрати енергії. При  $0 < \xi < 1$  перехідний процес коливальний, причому що менше  $\xi$ , то коливання інтенсивніші. В ідеальному

випадку  $\xi = 0$ . Це значить, що втрати енергії відсутні, й елемент зберігає незмінним первинний запас енергії. Тоді перехідний процес буде незгасаючим. Якщо  $\xi \geq 1$ , то втрати енергії настільки великі, що перехідний процес перестає бути коливальним. В цьому випадку ланку називають аперіодичною другого порядку і її можна замінити двома послідовно сполученими аперіодичними ланками.

Прикладами коливальної ланки є розглянуті раніше електричний ланцюг і механічна система (рис. 4.1). В електричному ланцюзі ємність  $C$  накопичує енергію електричного поля (потенційна енергія), а індуктивність  $L$  – енергію електромагнітного поля (кінетична енергія). Безповоротні втрати відбуваються на опорі  $R$ . Якщо опір  $R$  невеликий, то контур буде коливальним. У механічній системі рушійна маса накопичує кінетичну, а пружина – потенційну енергію. Втрати енергії відбуваються в демпфері.

Інтегруючою називається така ланка, вихідна величина якої пропорційна інтегралу за часом від вхідної величини:

$$x_{\text{вих.}}(t) = k \int_0^t x_{\text{вх.}}(t) dt . \quad (4.6)$$

Продиференціюймо ліву і праву частини цього рівняння:

$$\frac{dx_{\text{вих.}}(t)}{dt} = k x_{\text{вх.}}(t) . \quad (4.7)$$

З формули (4.7) видно, що швидкість зміни вихідної величини інтегруючої ланки пропорційна вхідній величині. При цьому коефіцієнт передачі  $k$  чисельно рівний швидкості зміни вихідної величини при одиничному значенні вхідної величини. Тому його називають коефіцієнтом передачі за швидкістю. Якщо вхідна й вихідна величини мають однакові розмірності, наприклад є напругою, то розмірність  $k$  дорівнює  $\text{сек}^{-1}$ . У цьому випадку зручно застосовувати не коефіцієнт передачі, а постійну часу інтегруючої ланки:

$$T = \frac{1}{k} . \quad (4.8)$$



Тоді рівняння ланки набуде вигляду:

$$U_{\text{вих.}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^t U_{\text{вх.}}(t) dt \quad (4.9)$$

або

$$T \frac{du_{\text{вих.}}}{dt} = u_{\text{вх.}}(t). \quad (4.10)$$

При постійному (східчастому) вхідному сигналі вихідний сигнал інтегруючої ланки змінюється з постійною швидкістю, тому його перехідна функція безперервно зростає за лінійним законом.

Відмітною властивістю інтегруючої ланки є та, що після припинення дії вхідного сигналу вихідний сигнал ланки залишається на тому ж рівні, на якому він був у момент зникнення вхідного сигналу. Інакше кажучи, в інтегруючої ланки є властивість «запам'ятовувати», тобто утримувати останнє значення вихідної величини (рис. 4.4). Завдяки «пам'яті» інтегруючої ланки досягається астатизм автоматичної системи керування.

У диференціюючій ланці вихідна величина пропорційна похідній за часом від вхідної:

$$x_{\text{вих}}(t) = k \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (4.11)$$

Іншими словами, вихідна величина диференціюючої ланки пропорційна швидкості зміни вхідної величини.

Якщо вхідна й вихідна величини ланки мають однакову розмірність, наприклад є напругою то розмірність  $k$  дорівнює сек.

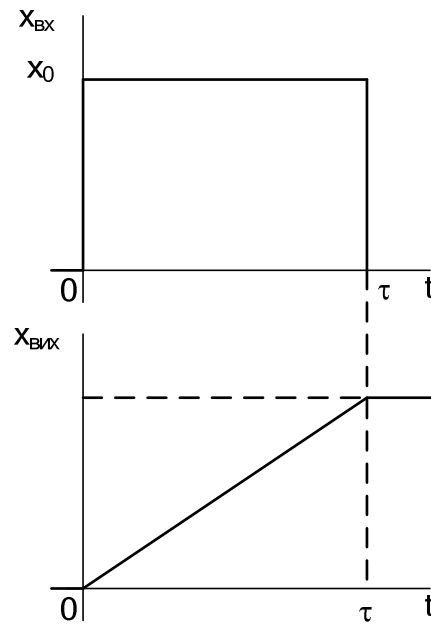


Рис. 4.4 – Характеристика інтегруючої ланки при подачі на вхід прямокутного імпульсу

Тоді рівняння ланки зручно записувати у вигляді:

$$U_{\text{вых}}(t) = T \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt}, \quad (4.12)$$

де  $T$  – постійна часу диференціюючої ланки.

Прикладом диференціюючої ланки є тахогенератор, оскільки напруга, що виробляється ним, пропорційна швидкості обертання його якоря, яка є похідною за часом від кута повороту.

Диференціююча ланка не пропускає постійного за величиною сигналу, але при подачі на його вхід ступінчастого сигналу на виході буде імпульс типу дельта-функції.

До типових ланок відносять і форсуючі ланки. Розрізняють форсуючі ланки першого і другого порядку. Форсуючі ланки можна сформувати з диференціюючих і підсилювальних. Наприклад, форсуюча ланка першого порядку описується диференціальним рівнянням:

$$x_{\text{вых}}(t) = k \left[ x_{\text{вх}}(t) + T \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} \right]. \quad (4.13)$$

Таку ланку можна одержати шляхом паралельного з'єднання диференціюючої й підсилювальної ланок.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається динамічною ланкою?
2. Що таке пропорційна ланка?
3. Що таке аперіодична ланка?
4. Які характеристики у коливальної ланки?
5. Яка ланка називається інтегруючою?
6. Що таке форсуючі ланки?
7. Як отримати форсуючі ланки?

### **5. Оцінки якості перехідних процесів в автоматичних системах керування**

У стійкій системі перехідний процес завжди затухає. Проте для практики зовсім не байдуже, який характер перехідного процесу. Так, наприклад, якщо перехідний процес затухає і система довго входить в новий сталий режим, то в неї недостатня бистродія і її використання обмежене.

Тому стійкість є необхідною, але недостатньою умовою «працездатності» автоматичних систем. Достатньою умовою є якість процесів регулювання, котре оцінюється якістю перехідних процесів і похибками в сталих режимах.

Якість перехідних процесів оцінюють за перехідною функцією  $h(t)$ , яка є реакцією системи на зовнішню дію типу одиничної ступінчастої функції  $1(t)$ . Для систем стеження і систем керування розглядають перехідну функцію по відношенню до задаючої дії, а для систем стабілізації – по відношенню до збурення.

Основні показники якості перехідного процесу:

- час регулювання;
- перерегулювання;
- основна частота коливань;
- кількість коливань;
- максимальна швидкість регульованої величини;
- максимальне прискорення регульованої величини.

Розглянемо ці показники якості на прикладі перехідного процесу, приведеному на рис. 5.1.

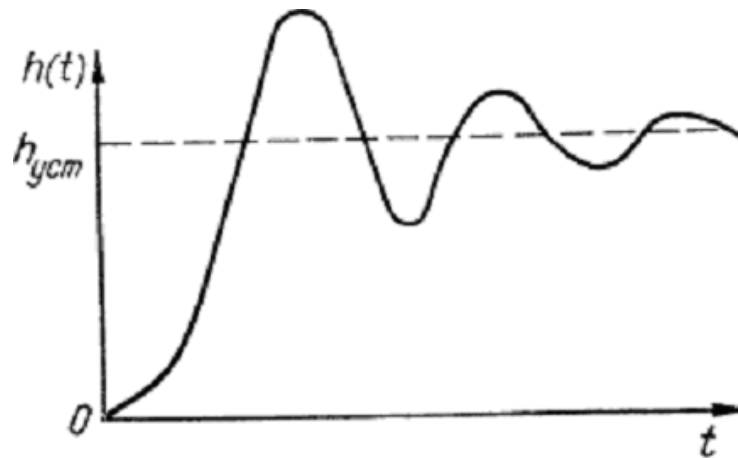


Рис. 5.1 – Часова діаграма перехідного процесу стійкої системи з перерегулюванням

Час регулювання  $t_p$  визначається тривалістю перехідного процесу. Теоретично перехідний процес триває нескінченно довго, проте на практиці вважають, що він закінчується, щойно відхилення регульованої величини від нового її сталого значення не перевищує допустимих меж, і складає  $\varepsilon = (3 - 5)\%$  від  $h_{уст}$ . Час регулювання характеризує швидкодію системи. Але іноді швидкодію характеризують також часом досягнення перехідною функцією перший раз нового сталого значення або часом досягнення максимального значення.

Перерегулювання  $\Delta h_{\max}$  – це максимальне відхилення регульованої величини від нового сталого значення  $\Delta h_{\text{уст}}$ . Перший максимум є найбільшим, а відносне перерегулювання обчислюють за формулою:

$$\sigma = \frac{\Delta h_{\max}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Час регулювання і перерегулювання як основні показники перехідного процесу тісно пов'язані між собою. Може здаватися, що перерегулювання неприпустиме, оскільки воно збільшує час регулювання, однак це не так. За наявності перерегулювання система до нового сталого стану підходить із певною швидкістю. Чим більша ця швидкість, тим далі за нове стале положення пройде система за інерцією. Для зменшення перерегулювання необхідно зменшити швидкість, із якою система підходить до нового сталого стану, що врешті-решт приведе до збільшення часу регулювання. Якщо система підходить до сталого стану з нульовою швидкістю, то перерегулювання взагалі не буде, але час регулювання значно збільшиться (рис. 5.2 ).

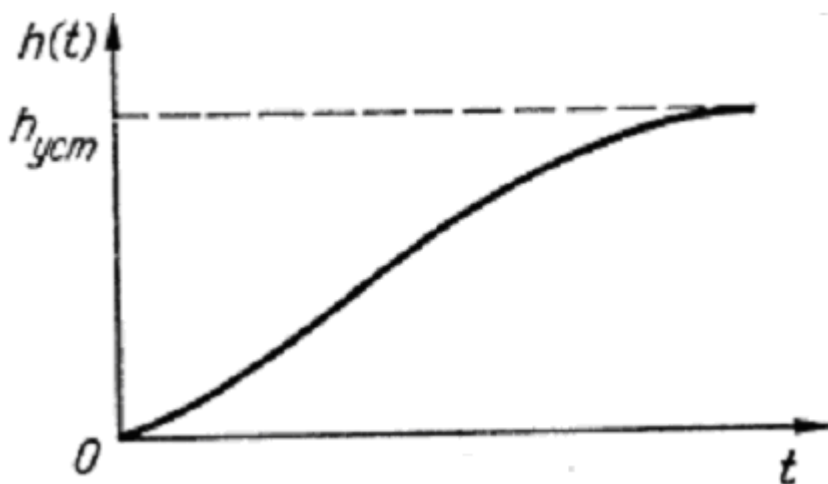


Рис. 5.2 – Часова діаграма перехідного процесу стійкої системи без перерегулювання

Оскільки час регулювання характеризує швидкість системи, то прагнуть, там де це необхідно, звести його до мінімуму. Це значить, що система має відпрацьовувати завдання з великою швидкістю, що у результаті

приводить до великого перерегулювання. Крім того, оскільки перехідний процес коливальний, то матимуть місце великі прискорення регульованої величини, що може викликати неприпустимо великі динамічні навантаження на елементи системи.

Таким чином, як відсутність, так і дуже велике перерегулювання небажані. Тому як оптимальне допускають перерегулювання в межах 20–30%. При цьому число напівколивань перехідної функції дорівнює 2 – 3.

Для деяких систем перерегулювання взагалі неприпустиме. Необхідно також мати на увазі, що прагнення зменшити час регулювання приводить до збільшення потужності виконавчого пристрою.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається перерегулюванням?
2. Які основні показники якості перехідного процесу?
3. За яким показником оцінюють якість перехідних процесів?
4. Що таке час регулювання?
5. Що є достатньою умовою якості процесів регулювання?
6. Чому стійкість є необхідною, але недостатньою умовою «працездатності» автоматичних систем?
7. До чого приводить прагнення зменшити час регулювання?

### **6. Обчислення похибок автоматичної системи від органів керування**

Розглянемо похибки деяких автоматичних систем. Статичні системи при ступінчастій дії мають сталу похибку:

$$\Delta x_{уст} = \frac{x_0}{1+k}, \quad (6.1)$$

яка називається статичною, або похибкою за положенням. Вона пропорційна величині задаючої дії і зменшується із збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи  $k$ . При діях, що змінюються в часі, похибка безперервно зростає. Наявність статичної похибки є характерною властивістю статичних систем.

Астатичні системи 1-го порядку точно відпрацьовують ступінчасту дію, але мають постійну похибку при відпрацюванні лінійно зростаючого сигналу. Ця похибка пропорційна швидкості зміни вхідного сигналу:

$$\Delta x_{уст} = \frac{v}{k}. \quad (6.2)$$

Зважаючи на це, її називають швидкісною помилкою, а коефіцієнт передачі розімкненої системи  $k$  – добротністю системи за швидкістю. Відсутність статичної помилки пояснюється наявністю в структурній схемі системи інтегруючої ланки.

Астатичні системи 2-го порядку точно відпрацьовують як ступінчастий, так і лінійно зростаючий сигнал. При відпрацюванні квадратичного сигналу має місце похибка, яка пропорційна прискоренню  $a$  вхідного сигналу і обернено пропорційна коефіцієнту посилення розімкненої системи  $k$ , який називається добротністю системи за прискоренням, а сама похибка – похибкою системи за прискоренням:

$$\Delta x_{уст} = \frac{a}{k}. \quad (6.3)$$

Отже, із збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи сталі похибки зменшуються, але погіршується стійкість автоматичних систем. Таким чином, вимога до точності суперечить вимозі до стійкості. При виборі величини  $k$  має бути ухвалено компромісне рішення.

## Контрольні запитання

1. Що називається похибкою за положенням?
2. Що називається статичною похибкою?
3. Яка похибка є характерною властивістю статичних систем?
4. Із збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи сталі похибки зменшуються чи збільшуються?
5. Що погіршує стійкість автоматичних систем?
6. Точність суперечить вимозі до стійкості системи чи ні?
7. Чи мають астатичні системи статичну похибку?

## 7. Корекція автоматичних систем

В системах, побудованих на принципі керування за відхиленням, незважаючи на наявність регулятора та основних функціонально необхідних елементів, не завжди можна одержати необхідні показники якості. Для замкнутих систем керування це пояснюється тим, що умови досягнення високої точності в установленому режимі не співпадають з умовами одержання високих показників якості в перехідному режимі.

Для зменшення похибки в установленому режимі необхідно підвищувати коефіцієнт підсилення системи в розімкнутому стані. В той же час з підвищенням цього коефіцієнта зменшується запас стійкості системи та погіршується перехідний процес. Можливо навіть, що система стане нестійкою раніш, ніж удасться одержати необхідний коефіцієнт підсилення. Тому, з метою зменшення похибки керування та збереження стійкості системи, необхідно відповідним чином внести зміни в частотні характеристики системи, тобто зробити корекцію системи.

Як видно з рис. 7.1, із збільшенням коефіцієнта підсилення системи  $k$  збільшується її частота зрізу  $\omega_c (\omega_{c2} > \omega_{c1})$ .



Таким чином, погіршення перехідного процесу і втрата стійкості при збільшенні коефіцієнта підсилення  $k$  системи пов'язані з наявністю в ній запізнювання коливань по фазі.

Для того щоб при збільшенні коефіцієнта підсилення  $k$  система залишалася стійкою і забезпечувався необхідний запас стійкості по фазі, необхідно частково компенсувати запізнювання в смузі частот, яка розташована до частоти зрізу  $\omega_{c2}$ .

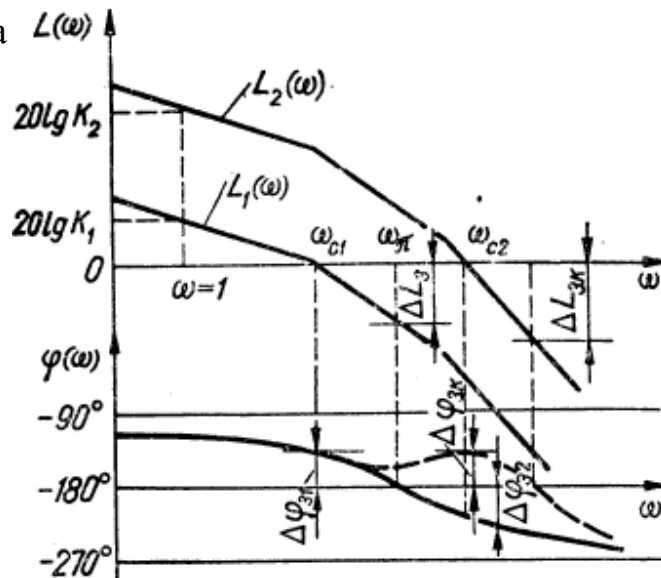


Рис. 7.1 – Логарифмічні частотні характеристики системи стеження:  
 $L_1(\omega)$  і  $L_2(\omega)$  – при коефіцієнтах підсилення відповідно  $k_1$  і  $k_2$ , де  $k_1 < k_2$

Це можна здійснити включенням послідовно елементів системи пристрою, який, на відміну від інших елементів, вносив би не запізнювання, а випередження по фазі синусоїдальних коливань у вказаній вище смузі частот.

Для цього потрібно скласти напругу сигналу розузгодження з похідною від нього (рис. 7.2).

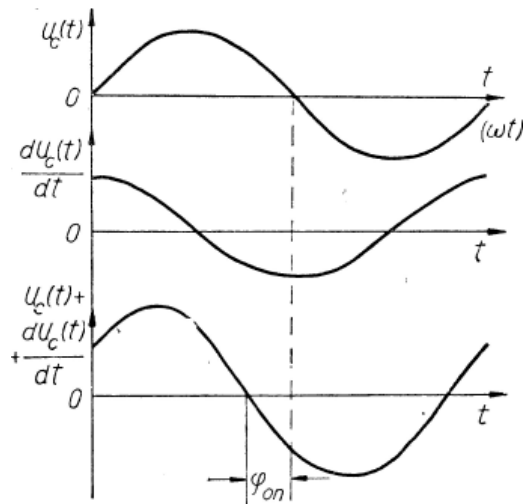


Рис. 7.2 – Часова діаграма складання синусоїдального сигналу з похідною від нього

Таке складання здійснюють за допомогою диференціюючого фазовипереджуючого пристрою.

Розглянемо фізичний зміст введення похідної в закон регулювання, який ілюструє рис. 7.3.

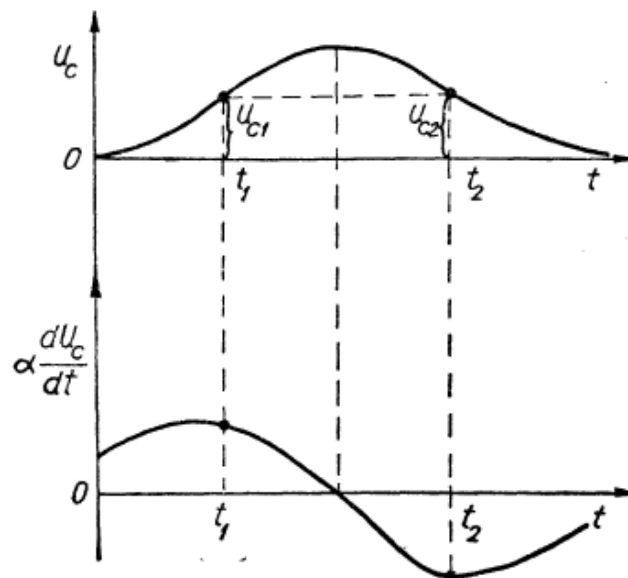


Рис. 7.3 – Часова діаграма, що ілюструє введення похідної в закон регулювання

Якщо система реагує тільки на сигнал розузгодження, то запізнювання сигналу при проходженні його через інерційні елементи система почне відпрацьовувати розузгодження не одразу, а через деякий час після його появи.

Якщо ж на виконавчий орган системи поступатиме напруга пропорційна не тільки сигналу розузгодження, але і його похідній, то виконавчий орган системи почне відпрацьовувати похибку значно раніше і швидше, оскільки похідна при малому сигналі розузгодження має кінцеве значення.

### **Контрольні запитання**

1. Що буде, якщо система реагує тільки на сигнал розузгодження?
2. Що необхідно для зменшення похибки в установленному режимі?
3. Що необхідно для зменшення похибки керування та збереження стійкості?
4. Із збільшенням коефіцієнта підсилення системи збільшується її частота зрізу чи ні?
5. Який фізичний смисл введення похідної в закон регулювання?
6. Як реагує виконавчий орган при наявності похідної від сигналу розузгодження?

### **8. Структура багаторівневої системи керування та її складові**

Багаторівневі системи керування набули найбільшого поширення при впровадженні сучасних частотно-регульованих асинхронних електроприводів із мікропроцесорними системами керування на електричному транспорті.

Багаторівневі системи керування призначені для реалізації режимів роботи тягового асинхронного електроприводу, керування роботою допоміжного обладнання, контролю та діагностування електрообладнання.

Розглянемо структуру багаторівневої системи керування, приведену на рис. 8.1, яку можна впровадити, наприклад, на трамвайному вагоні або вагоні метрополітену.

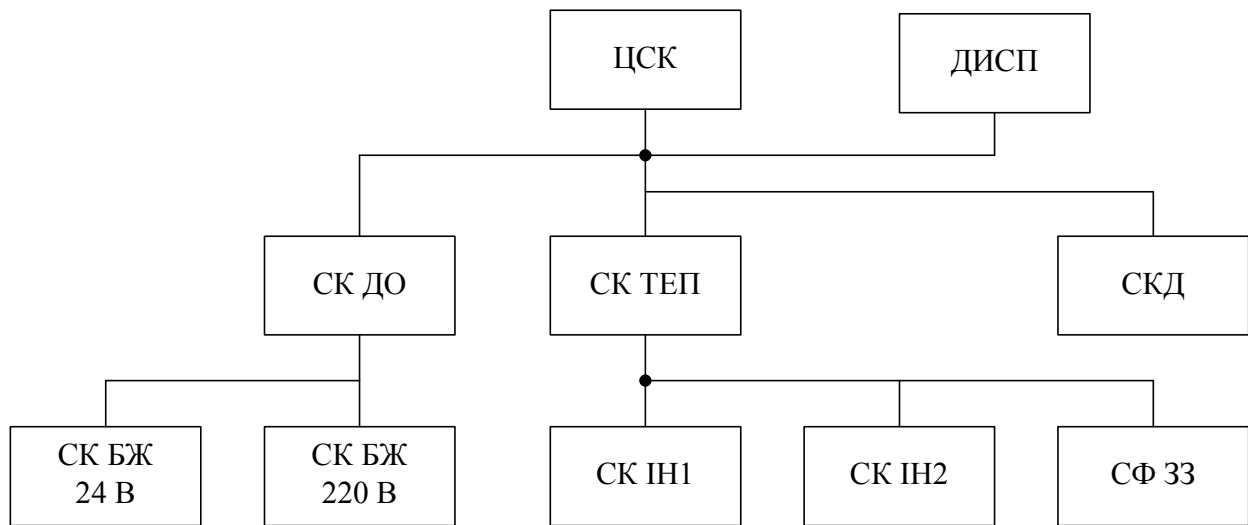


Рис. 8.1 – Структура багаторівневої системи керування

На рис. 8.1 прийняті наступні позначення:

ЦСК – центральна система керування;

ДИСП – багатофункціональний дисплей;

СК ТЕП – система керування тягового електроприводу;

СК ІН 1, СК ІН 2 – системи керування відповідно першого та другого інверторів напруги;

СФ33 – система формування зворотних зв'язків;

СКД – система контролю та діагностики;

СК ДО – система керування допоміжним обладнанням;

СК БЖ 24В – система керування блока живлення 24 В;

СК БЖ 220В – система керування блока живлення 220 В;

СК ОП – система керування опалення;

СК ВЕН – система керування вентиляції.

Багаторівнева система керування – підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має центральна система керування з дисплеєм. В центральній системі керування формуються команди, якими задаються режими

роботи систем другого рівня. Ці команди висвітлюються на багатофункціональному дисплеї. На другому рівні знаходяться система керування тягового електроприводу, система контролю та діагностики і система керування допоміжним обладнанням, які формують відповідні команди для систем керування третього рівня. Системи керування інверторами напруги, система формування зворотних зв'язків, а також системи керування блоками живлення 24 В і 220 В, системи керування опаленням, вентиляцією та ін. мають найнижчий, третій рівень.

Зв'язок між ЦСК та системами керування другого рівня і системами керування другого й третього рівнів здійснюється, як правило, цифровими каналами зв'язку. Це покращує перешкодостійкість при передачі інформації.

Інформація про роботу окремих вузлів, агрегатів і систем направляється в зворотному напрямку через цифрові канали зв'язку в ЦСК і висвітлюється на багатофункціональному дисплеї.

Структура системи керування, яка забезпечує реалізацію режимів роботи тягового електроприводу, залежить від структури тягового електроприводу.

Для прикладу, розглянемо тяговий електропривод з чотирма асинхронними електродвигунами (ТАД), який живиться від мережі постійного струму. Для такого електроприводу можна виділити три основні структурні схеми:

- з одним автономним інвертором напруги;
- з двома автономними інверторами напруги;
- з чотирма автономними інверторами напруги.

На рис. 8.2 наведена структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги для всіх тягових електродвигунів.

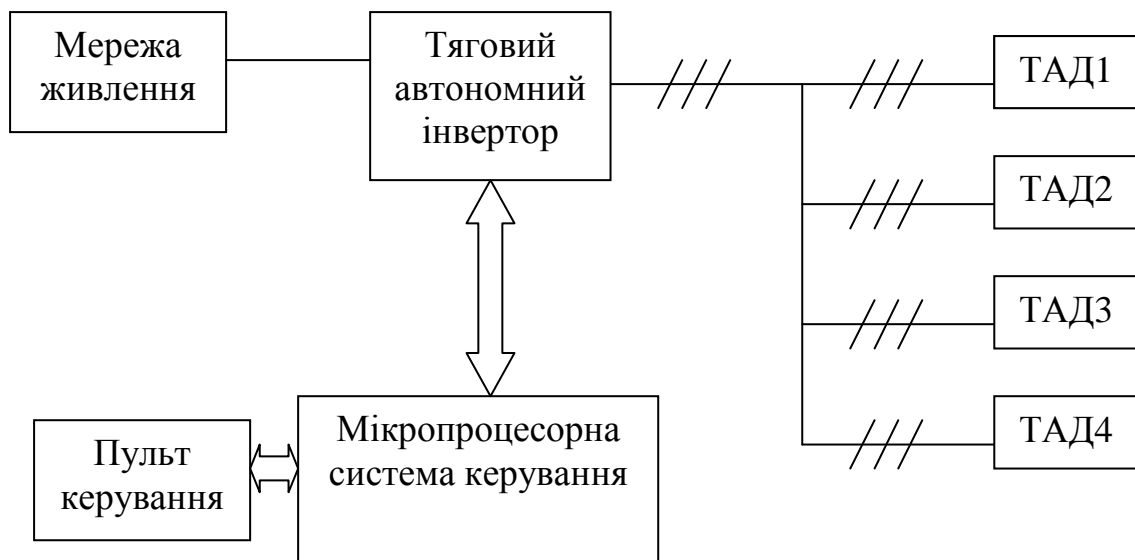


Рис. 8.2 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги

Така схема забезпечує високі масо-габаритні показники щодо електричного обладнання, але має вагомий недолік: у випадку виходу з ладу автономного інвертора напруги або відмови в його системі керування – виключається можливість роботи електричного приводу. Тому схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги не знайшла широкого використання в якості тягового.

Більш доцільною (з точки зору надійності й оптимальних масо-габаритних показників) є структурна схема електричного приводу, в якій від одного автономного інвертора напруги живиться два тягових електродвигуни. Така схема наведена на рис. 8.3.

В цьому випадку при відмові одного з двох інверторів 50 % тягової потужності зберігається і рухомий склад може (без пасажирів) пересуватися в депо самостійно, що виключає затримку руху на лінії.

Недоліком такої структури є те, що у випадку виходу з ладу одного автономного інвертора напруги тільки 50 % тягової потужності зберігається, що не дозволяє перевозити пасажирів.

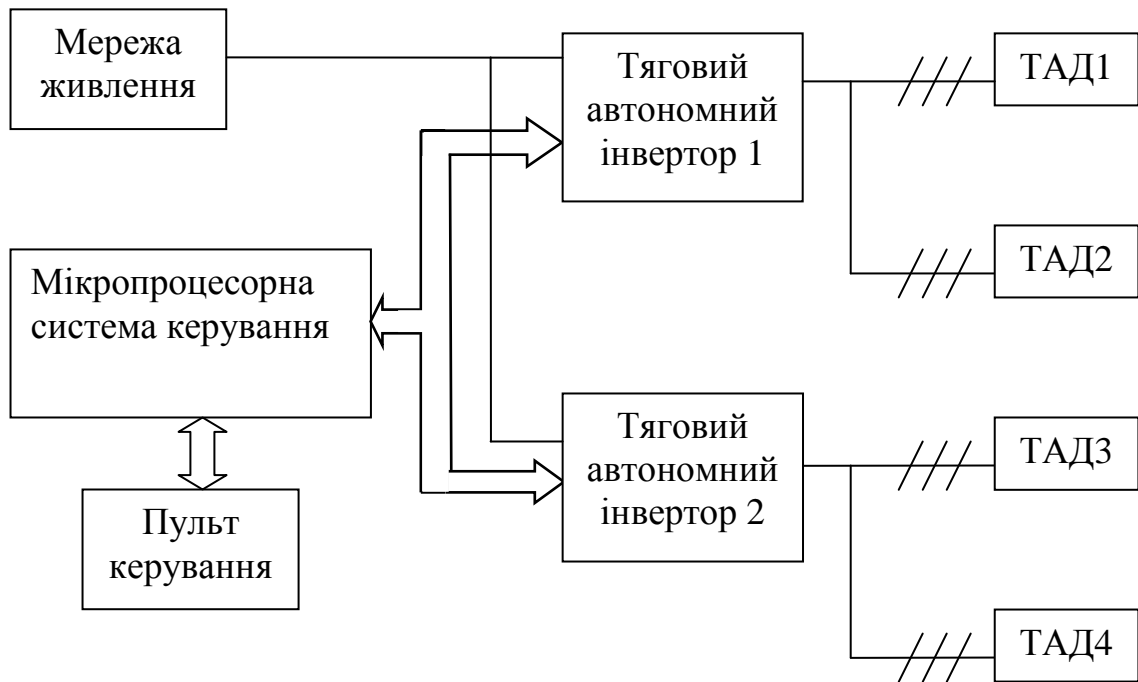


Рис. 8.3 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги на два електродвигуни

Найбільш надійною є структура електричного приводу з індивідуальними автономними інверторами напруги на кожен тяговий електродвигун (рис. 8.4).

За такої структури в разі відмови одного автономного інвертора напруги потужність електроприводу знижується лише на 25 %, що дозволяє пересуватися рухомому складу з мінімальними втратами потужності.

До недоліків такої схеми слід віднести гірші масо-габаритні показники електричного обладнання.

Одна з основних вимог при розробці електрообладнання – це його уніфікація. Тому окремі вузли та блоки, при реалізації мікропроцесорної системи керування, мають бути уніфікованими незалежно від того, яку структуру має схема електроприводу.

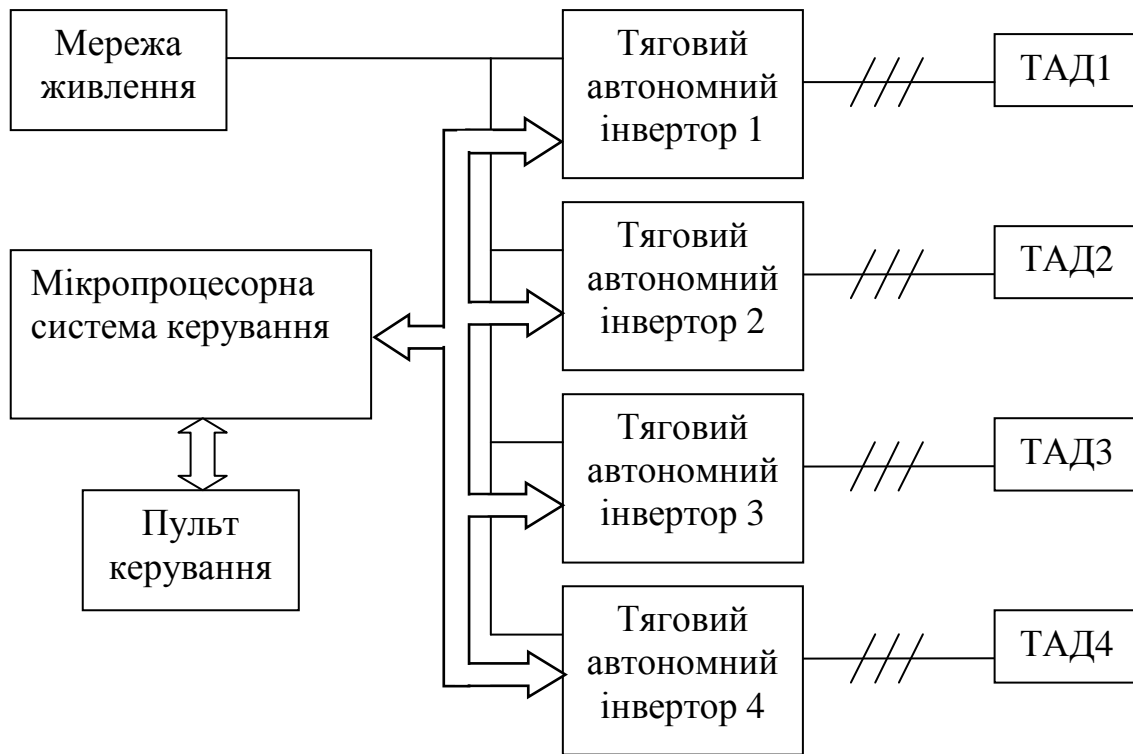


Рис. 8.4 – Структурна схема електроприводу з індивідуальними автономними інверторами напруги

Розглянемо спрощену структуру системи керування для тягового асинхронного електроприводу з одним електродвигуном, приведену на рис. 8.5.

До складу системи керування електроприводом входять:

- пульт керування;
- мікропроцесорна система керування;
- системи керування інвертором напруги;
- датчик постійної напруги;
- датчик постійного струму;
- датчики змінного струму за числом фаз;
- датчик обертів електродвигуна;
- дисплей.



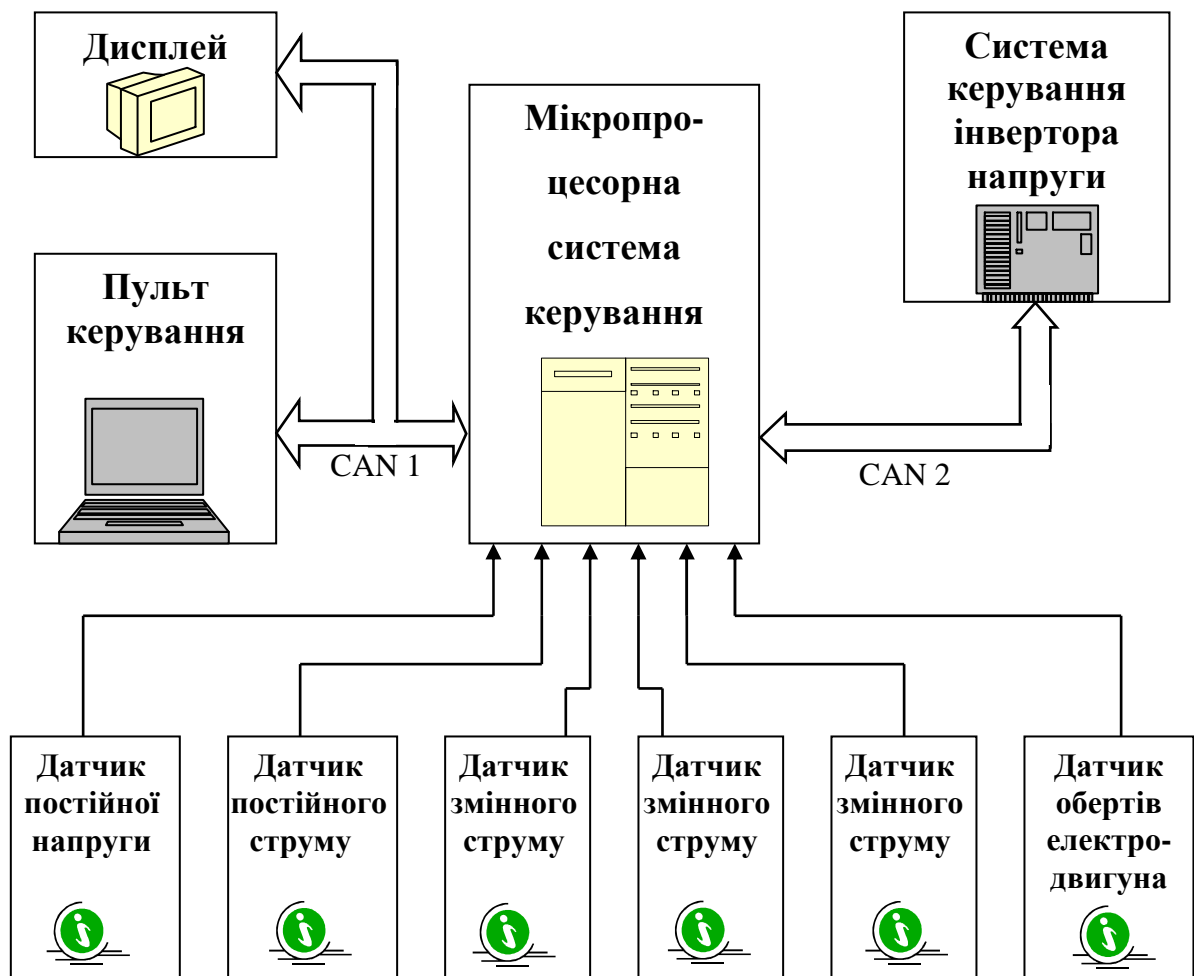


Рис. 8.5 – Структура системи керування для тягового асинхронного електроприводу з одним електродвигуном

Система керування асинхронним електроприводом підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має пульт керування.

На другому рівні знаходиться мікропроцесорна система керування. Система керування інвертором напруги має найнижчий, третій рівень. Це умовно позначається таким чином: пульт керування – Master для мікропроцесорної системи керування, а вона для нього – Slave. В свою чергу мікропроцесорна система керування – Master для системи керування інвертора напруги, а остання – Slave для першої.

Зв'язок між пультом керування та мікропроцесорною системою керування здійснюють цифровим каналом зв'язку CAN1, а зв'язок між

мікропроцесорною системою керування та системою керування інвертора напруги – цифровим каналом зв'язку CAN2.

Датчики постійної напруги та постійного струму необхідні для формування зворотного зв'язку за потужністю.

Датчики змінного струму необхідні для формування зворотного зв'язку з фазного струму.

Датчик обертів електродвигуна необхідний для частотного каналу.

Дисплей відображає режим роботи електроприводу.

### **Контрольні запитання**

1. Для чого призначені багаторівневі системи керування?
2. В багаторівневій системі керування системи нижчого рівня підпорядковані системам вищого рівня чи навпаки?
3. Як здійснюється зв'язок між системами різних рівнів?
4. Куди поступає інформація про роботу окремих вузлів, агрегатів і систем ?
5. Які складові входять до системи керування електроприводом ?
6. Як умовно називають системи одного рівня по відношенню до іншого?

## **9. Мікропроцесорні системи керування асинхронного електроприводу**

Місце мікропроцесорної системи керування в структурі системи керування тягового асинхронного електроприводу видно з рис. 8.5. МПСК пов'язана з пультом керування та системою керування інвертором напруги цифровими каналами зв'язку CAN1 та CAN2. По цифровому каналу зв'язку CAN1 в МПСК надходять сигнали керування з пульта керування, а у зворотному напрямку йде інформація про режими роботи та основні параметри систем електроприводу. По цифровому каналу зв'язку CAN2 з МПСК надходять сигнали керування в систему керування інвертором напруги, а у

зворотному напрямку йде інформація про режими роботи та основні параметри інвертора напруги. Крім того, в МПСК надходять сигнали від датчиків напруги, струму та обертів електродвигуна. Якщо датчики об'єднані в систему формування зворотних зв'язків, то вказані сигнали можуть поступати в МПСК по цифровому каналу зв'язку CAN3.

В МПСК формуються керуючі сигнали для системи керування інвертором напруги, які забезпечують реалізацію необхідних законів керування електроприводом.

### **9.1 Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування**

Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування для тягового та гальмівного режимів, можна розрахувати, використовуючи основні положення теорії електричної тяги. При розрахунках всі розмірності приводити в системі СІ.

Сила тяги витрачається на подолання сили опору руху рухомого складу та забезпечення йому заданого прискорення:

$$F = m * a + W, \quad (9.1)$$

де  $m$  – приведена маса рухомого складу;

$a$  – задане прискорення рухомого складу;

$W$  – сила опору руху рухомого складу.

Максимальна сила тяги дорівнює:

$$F_{\max} = m * a_{\max} + W, \quad (9.2)$$

де  $a_{\max}$  – максимальне прискорення рухомого складу.

Потужність електроприводу дорівнює:

$$P = P_{\text{пит}} * G, \quad (9.3)$$

де  $P_{\text{пит}}$  – питома потужність електроприводу;

$G$  – вага рухомого складу.

Потужність тягового електродвигуна:

$$P_{\text{дв}} = P / n, \quad (9.4)$$

де  $n$  – кількість електродвигунів електроприводу.

Мінімальну швидкість руху рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні можна прийняти рівною:

$$V_1 = V_{\text{min}}, \quad (9.5)$$

де  $V_{\text{min}} = 5$  км/год.

Максимальна швидкість рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_2 = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / F_{\text{max}}, \quad (9.6)$$

де  $\eta_{\text{ред}}$  – ККД редуктора.

Для забезпечення незмінного тягового зусилля (при  $V_1 \geq V \geq V_2$ ) треба дотримуватись закону керування:

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (9.7)$$

Подальше формування тягової характеристики (при  $V > V_2$ ) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила тяги дорівнює:

$$F = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / V. \quad (9.8)$$

Для забезпечення незмінної потужності електроприводу треба дотримуватись закону керування:

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const.} \quad (9.9)$$

Для забезпечення незмінної швидкості рухомого складу потрібно дотримуватись закону керування:

$$V = \text{const.} \quad (9.10)$$

На основі (9.5), (9.6) та (8.8) можна розрахувати та побудувати граничну тягову характеристику.

Для розрахунку та побудови механічної характеристики електроприводу, яка має формуватися системою керування, можна скористатися формулами:

$$M = F * D_k / (2 * i_{\text{ред}} * \eta_{\text{ред}}), \quad (9.11)$$

$$n_{\text{дв}} = 60 * i_{\text{ред}} * V / (3,6 * \pi * D_k), \quad (9.12)$$

$$M = P_{\text{дв}} * \pi / (30 * n_{\text{дв}}), \quad (9.13)$$

$$i_{\text{ред}} = 3,6 * \pi * D_k * n_{\text{дв max}} / (V_{\text{max}} * 60), \quad (9.14)$$

$$\omega = 2 * \pi * n_{\text{дв}} / 60, \quad (9.15)$$

де  $D_k$  – діаметр колеса;

$i_{\text{ред}}$  – передавальне число редуктора;

$V_{\text{max}}$  – максимальна швидкість рухомого складу;

$n_{\text{дв max}}$  – максимальні оберти електродвигуна;

$\omega$  – частота обертання електродвигуна.

При розрахунку та побудові гальмівної характеристики рухомого складу можна прийняти:

$$B_{\max} = (1 \dots 1,2) F_{\max}, \quad (9.16)$$

$$V_{\text{гальм1}} = V_{\min}, \quad (9.17)$$

де  $B_{\max}$  – максимальна сила гальмування;

$V_{\text{гальм1}}$  – мінімальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні.

Звідки максимальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_{\text{гальм2}} = 3,6 * n * P_{\text{дв}} / (B_{\max} * \eta_{\text{ред}}). \quad (9.18)$$

Подальше формування гальмівної характеристики (при  $V > V_{\text{гальм2}}$ ) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила гальмування дорівнює:

$$B = 3,6 * n * P_{\text{дв}} / (V * \eta_{\text{ред}}). \quad (9.19)$$

Гальмівний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{\text{гальм}} = B * \eta_{\text{ред}} * D_{\text{к}} / (2 * i_{\text{ред}}). \quad (9.20)$$

Механічні характеристики електроприводу у відносних одиницях наведені на рис. 9.1.

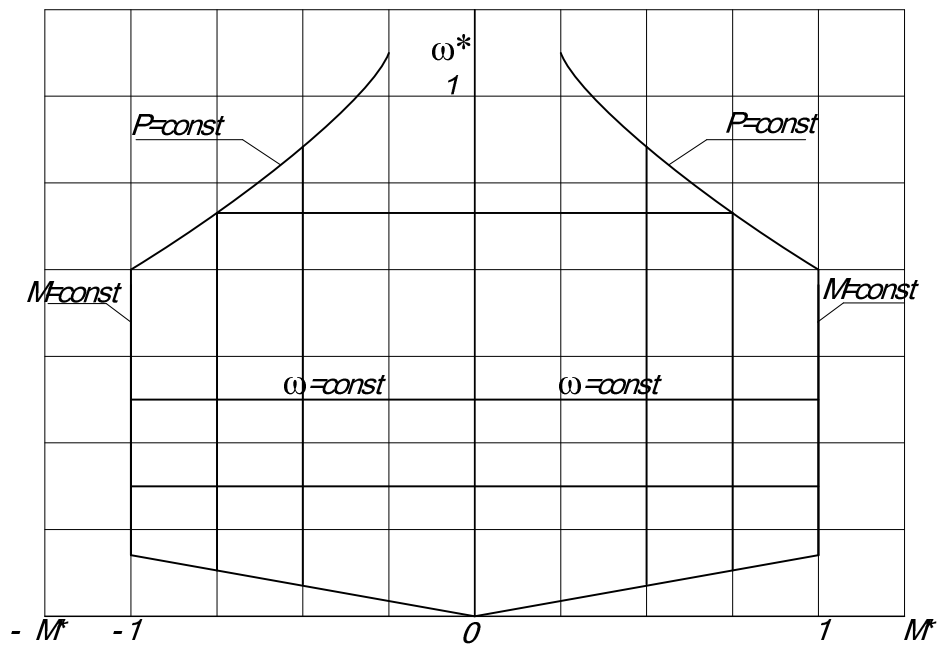


Рис. 9.1 – Механічні характеристики електроприводу

## 9.2 Структура мікропроцесорної системи керування асинхронного електроприводу

Мікропроцесорна система керування асинхронного електроприводу має два канали керування. В першому каналі на основі сигналів від датчиків напруги, струму та обертів електродвигуна формується сигнал керування напругою інвертора напруги, який забезпечує реалізацію законів керування:

$$U_1/f_1 = \text{const}, \quad (9.21)$$

для отримання незмінного моменту на валу електродвигуна;

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}, \quad (9.22)$$

для забезпечення незмінної потужності електроприводу;

$$V = \text{const}, \quad (9.23)$$

для забезпечення незмінної швидкості електроприводу.

В другому каналі на основі сигналу по обертам електродвигуна та заданому ковзанню формується сигнал керування частотою напруги статора:

$$f_1 = f_p + f_s, \quad (9.24)$$

де  $f_p$  – сигнал, пропорційний частоті ротора;

$f_s$  – задане ковзання.

На рис. 9.2 наведена функціональна схема каналу керування напругою інвертора.

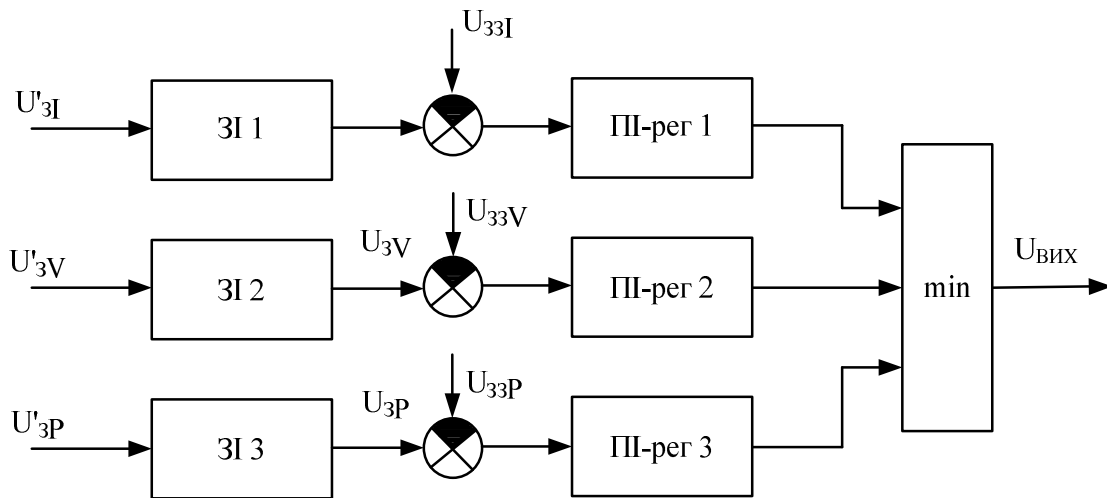


Рис. 9.2 – Функціональна схема каналу керування напругою інвертора

Для забезпечення формування механічної характеристики електроприводу, наведеної на рисунку 9.1, в каналі керування напругою інвертора необхідно передбачити три канали регулювання:

- струму;
- потужності;
- швидкості.

Кожний канал, в свою чергу, повинен мати задатчик інтенсивності (ЗІ1, ЗІ2, ЗІ3) та пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) або пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор).

Задатчик інтенсивності служить для одержання необхідного закону зміни в часі сигналу керування, який задають.

Схемою мінімуму вибирають мінімальний із трьох вихідних сигналів регуляторів. Працює канал, в якого на виході регулятора – найменший сигнал.

Після подачі сигналу керування, в перший момент часу, зворотного зв'язку від датчиків немає, система регулювання – розімкнута. Зі зростанням зворотних зв'язків мікропроцесорна система керування забезпечує регулювання пускового струму та моменту (рис. 9.1). Тобто в пусковому режимі спочатку працює канал



регулювання струму, а по мірі розгону електроприводу – здійснюється автоматичний перехід в канал регулювання потужності або швидкості.

### 9.3 Елементи мікропроцесорної системи керування

Для формування сигналів завдання систем керування, що змінюються за заданим законом, служать задатчики інтенсивності (ЗІ). Зокрема ЗІ використовуються для забезпечення необхідної динаміки електроприводу в режимах пуску й гальмування.

Задатчик інтенсивності являє собою інтегратор (див. розділ 4) і є типовою ланкою автоматичної системи керування.

За певних умов і аперіодична ланка може бути інтегратором. Розглянемо електричний ланцюг RC, наведений на рис. 9.3, який є аперіодичною ланкою.

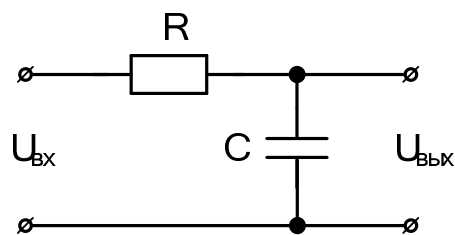


Рис. 9.3 – Схема RC-ланки

Її диференціальне рівняння й передаточна функція відповідно мають вигляд:

$$T \frac{du_{вих.}}{dt} + u_{вих.} = u_{вх.} \quad (9.25)$$

$$W(p) = \frac{U_{вих.}(p)}{U_{вх.}(p)} = \frac{1}{1+Tp}, \quad (9.26)$$

де  $T$  – постійна часу, що дорівнює:

$$T = RC. \quad (9.27)$$

Перехідну функцію 2 ланки RC на інтервалі  $0 < t < t_1$  приблизно можна замінити дотичною до експоненти (рис. 9.4).

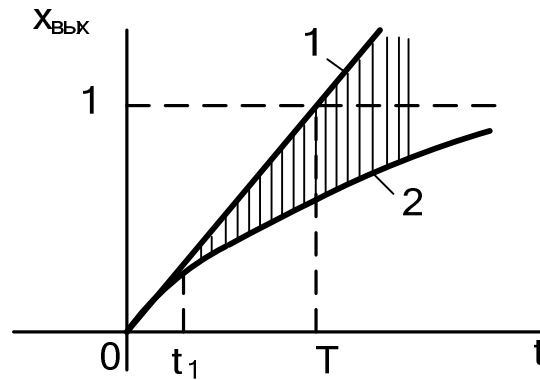


Рис. 9.4 – Перехідна функція аперіодичної ланки

Це означає, що ланку  $RC$  в цьому випадку можна вважати інтегруючою. Максимальний час інтеграції  $t_1$  має бути значно меншим постійної часу  $T$ . Що більше постійна часу, то більшим можна припустити інтервал інтеграції без істотних похибок.

Розглянутий ланцюг  $RC$  можна використовувати для плавного зростання сигналу завдання системи керування.

На рис. 9.5 наведена структурна схема ПІ-регулятора, який складається з пропорційного та інтегрального регуляторів, включених паралельно. ПІ-регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної та інтегральної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{\text{вих}}(p) = (K_p + K_i/p) * U_{\text{вх}}(p), \quad (9.28)$$

$$K_i = 1/T_i. \quad (9.29)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт посилення регулятора;

$T_i$  – постійна часу інтегрування.

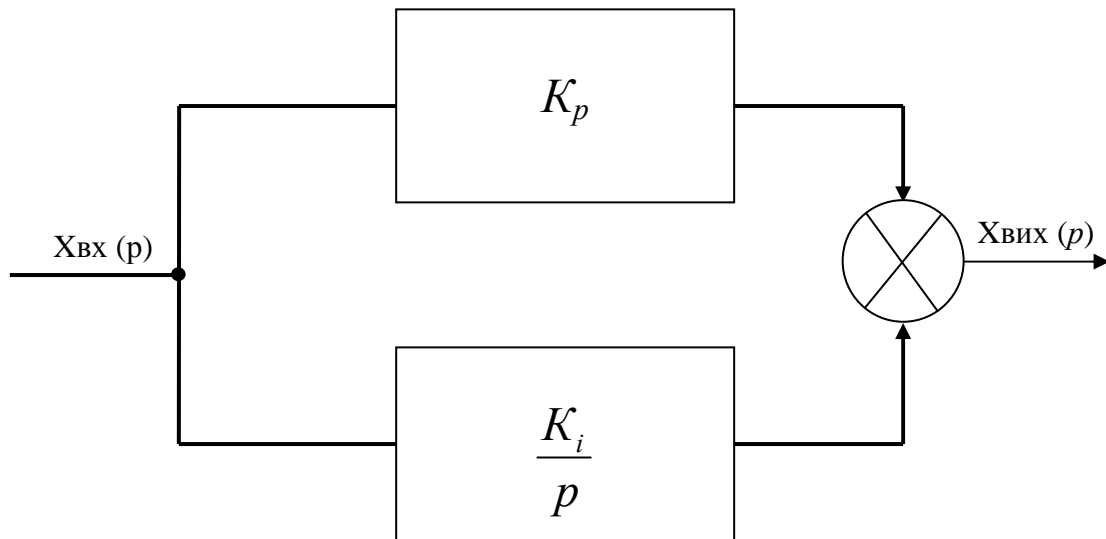


Рис. 9.5 – Структурна схема ПІ-регулятора

На рис. 9.6 наведена структурна схема ПД-регулятора.

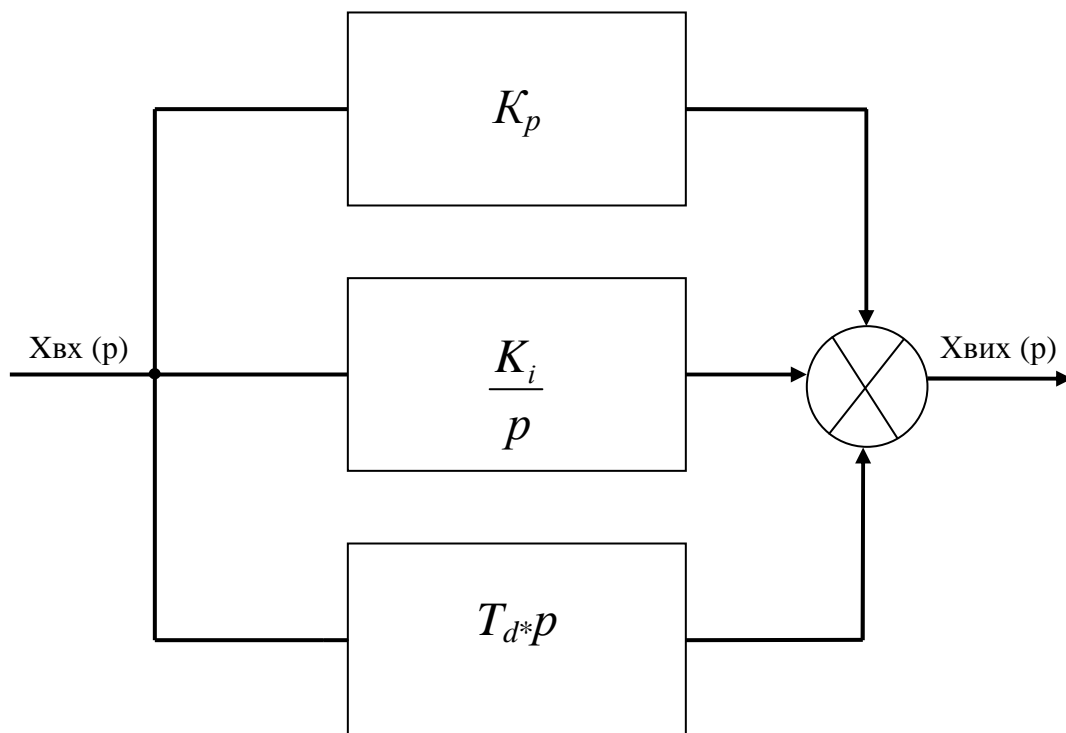


Рис. 9.6 – Структурна схема ПД- регулятора

ПД - регулятор складається з пропорційного, інтегрального та диференціального регуляторів, включених паралельно.

ПД-регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної, інтегральної та диференціальної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{\text{вих}}(p) = (K_p + K_i/p + T_d * p) * U_{\text{вх}}(p), \quad (9.30)$$

де  $T_d$  – постійна часу диференціювання.

Складові ПІД-регулятора можна розглянути, використовуючи операційні підсилювачі.

На рис. 9.7 наведений підсилювач напруги з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати пропорційний регулятор.

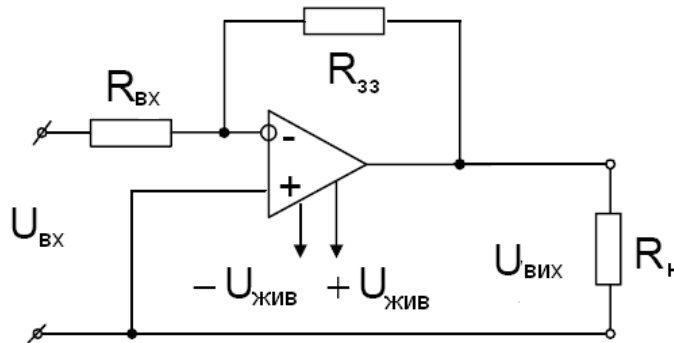


Рис. 9.7 – Підсилювач напруги

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - (R_{\text{зз}} / R_{\text{вх}}) * U_{\text{вх}}, \quad (9.31)$$

або

$$U_{\text{вих}} = - K * U_{\text{вх}}, \quad (9.32)$$

де  $R_{\text{зз}}$  – опір резистора зворотного зв'язку;

$R_{\text{вх}}$  – опір вхідного резистора;

$K$  – коефіцієнт підсилення.

На рис. 9.8 наведений інтегральний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати інтегральний регулятор.

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - (1 / (R_{\text{вх}} * C_{\text{зз}})) \int U_{\text{вх}} * dt. \quad (9.33)$$

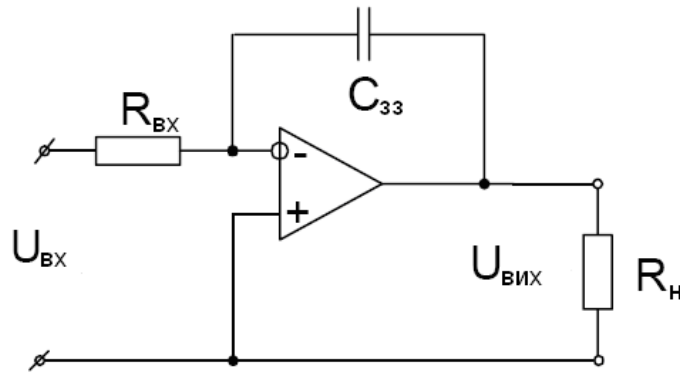


Рис. 9.8 – Інтегральний підсилювач

На рис. 9.9 наведений диференціальний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати диференціальний регулятор.

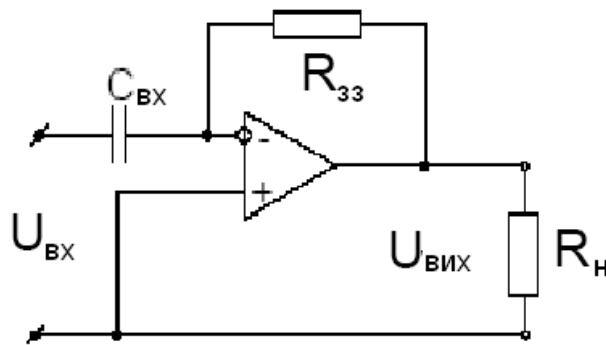


Рис. 9.9 – Диференціальний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{ВИХ}} = -R_{\text{BX}} * C_{33} * dU_{\text{BX}} / dt. \quad (9.34)$$

Вказаний вище задатчик інтенсивності можна представити аперіодичним елементом:

$$U_{\text{ВИХ}}(p) = (1 / (T_{\text{зі}} * p + 1)) * U_{\text{ВХ}}(p) \quad (9.35)$$

де  $T_{\text{зі}}$  – постійна часу задатчика інтенсивності.

## **Контрольні запитання**

1. Що називається задатчиком інтенсивності?
2. Які властивості має задатчик інтенсивності?
3. Яким чином можна регулювати величину вихідного сигналу задатчика інтенсивності?
4. Яке місце займає МПСК у структурі системи керування тягового асинхронного електроприводу?
5. Який канал МПСК забезпечує реалізацію необхідних законів керування електроприводом?
6. Які елементи входять до складу МПСК?
7. Які закони керування забезпечують формування механічної характеристики електроприводу?
8. Які типи регуляторів ви знаєте?

## **10. Цифрові канали зв'язку**

В цифрових каналах зв'язку використовують CAN-протокол, що був розроблений фірмою Robert Bosch GmbH для автомобільної промисловості.

CAN-протокол відрізняється підвищеною перешкодостійкістю, надійністю і має такі властивості:

- дозволяє отримувати повідомлення всіма вузлами з синхронізацією в часі;
- забезпечує арбітраж доступу до шини;
- виявляє похибки і передає сигнали щодо них;
- забезпечує автоматичну передачу повідомлень при отриманні можливості повторного доступу до шини;
- розрізняє випадкові похибки від постійних відмов;
- забезпечує роботу по витій парі на відстані до 1 км.

Все це робить CAN-протокол доволі привабливим для використання при розробці нових проектів. Тим більше що декілька фірм випускають недорогі

контролери, котрі апаратно реалізують вимоги CAN-протоколу і працюють у широкому температурному діапазоні.

CAN-протокол має наступні рівні:

- об'єктний рівень, що забезпечує фільтрацію та обробку повідомлень і стану;
- транспортний рівень, що представляє собою ядро CAN-протоколу. Він відповідає за синхронізацію, арбітраж, доступ до шини, розподіл посилок на фрейми, визначення й передачу похибок і мінімізацію несправностей;
- фізичний рівень визначає, як саме будуть передаватися сигнали, їх електричні рівні й швидкість передачі.

Фізичний рівень визначають стандартом ISO 11898.

Диференційне вмикання прийомопередавачів забезпечує затухання синфазної перешкоди. При цьому рівень сигналів складає третину від значення напруги живлення. Саму напругу живлення не визначають жорстко.

Наприклад, типові значення сигнальних рівнів в CAN-шині при напрузі живлення +5В наведені на рис. 10.1, причому домінуючим рівнем є найнижчий рівень, а рецесивним, відповідно, верхній.



Рис. 10.1 – Типові значення сигнальних рівнів у CAN-шині

Максимальна відстань між вузлами – до 1 км.

Швидкість обміну – до 1 Мбіт/с при довжині лінії 60 м.

Можливість використання гальванічної розв'язки, причому гальванічна розв'язка може встановлюватися або між прийомопередаючим буфером і мікросхемою, яка забезпечує функції CAN, або між мікросхемою й іншою системою.

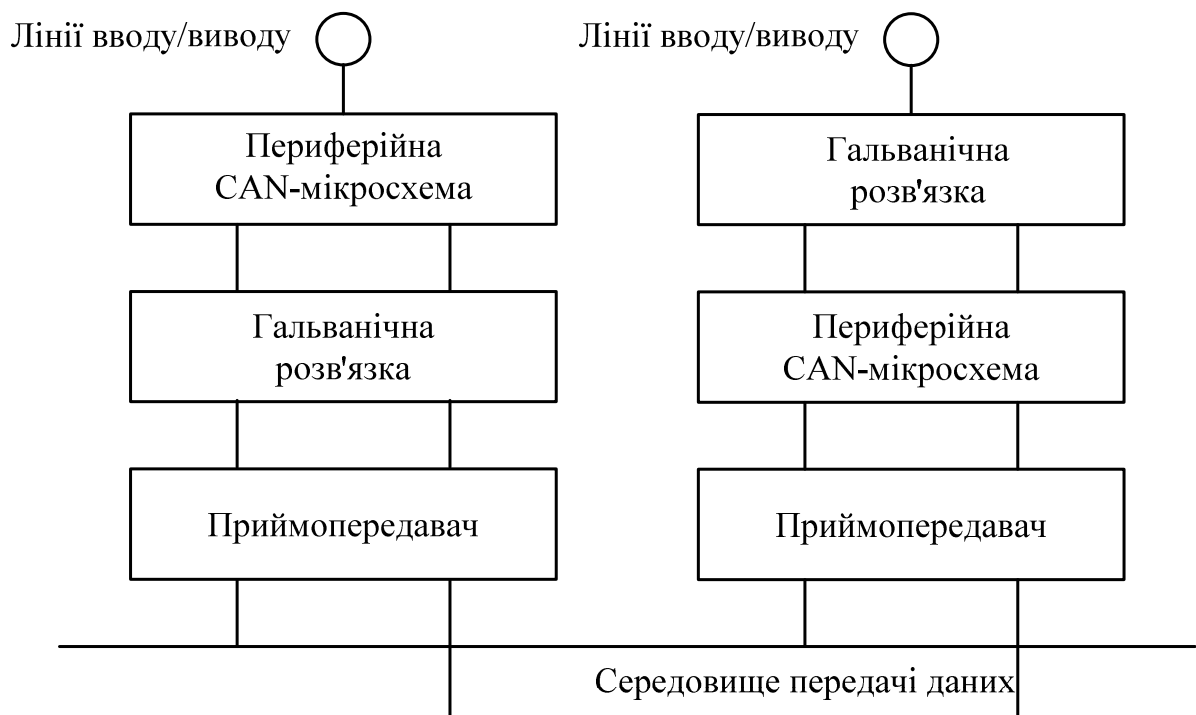


Рис. 10.2 – Два типи гальванічної розв'язки

### Контрольні запитання

1. Де використовують CAN-протокол ?
2. Завдяки чого CAN-протокол привабливий для використання при розробці нових проектів?
3. Які типові значення сигнальних рівнів в CAN-шині при напрузі живлення +5В?
4. Який із сигнальних рівнів є домінуючим у CAN-шині?
5. Яка максимальна відстань між вузлами при передачі інформації?
6. Яка швидкість обміну в CAN-шині при довжині лінії 60 м?
7. Скільки сигнальних рівнів в CAN-шині?



## 11. Протоколи обміну

Для створення CAN-протоколу необхідно розробити протокол обміну між Master і Slave. Приклад такого протоколу обміну між пультом керування (ПК) та мікропроцесорною системою керування (МПСК) наведений у таблиці 11.1. Аналогічний вигляд має протокол обміну між МПСК та системою керування інвертора напруги (СКІН).

Таблиця 11.1 – Протокол обміну між пультом керування та мікропроцесорною системою керування

№ п/п	Параметр	Одиниця виміру	Інформаційний зміст	Джерело
1	2	3	4	5
1.	$I_{\phi}$	1 байт	Діюче значення струму	МПСК
2.	$V$	1 байт	Швидкість об'єкта	МПСК
3.	$P$	1 байт	Потужність електроприводу	МПСК
4.	$I_d$	1 байт	Активний струм на вході інвертора напруги	МПСК
5.	$U_d$	1 байт	Напруга мережі живлення	МПСК
6.	$N_{\text{км}}$	4 біт	Номер позиції контролера	ПК
7.	$F_{\text{рух}}$	1 біт	Режим «Рух»	ПК
8.	$F_{\text{гальм}}$	1 біт	Режим «Гальмування»	ПК
9.	$F_{\text{вибіг}}$	1 біт	Режим «Вибіг»	ПК
10.	$F_{\text{в}}$	1 біт	Рух «Вперед»	ПК
11.	$F_{\text{н}}$	1 біт	Рух «Назад»	ПК
12.	$F_{\text{ін}}$	1 біт	Команда на включення інвертора напруги	ПК

### Контрольні запитання

1. Які сигнали поступають із пульта керування?
2. Які сигнали поступають із МПСК?
3. Звідки задаються режими роботи електроприводу?
4. Які одиниці виміру дискретних сигналів?
5. Які одиниці виміру аналогових сигналів?
6. Які сигнали поступають в ПК?
7. Куди поступають дискретні сигнали?

## Список джерел

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, И. Б. Клепиков та ін.; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : «Либідь», 2005. – 680 с.
2. Теорія автоматичного керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : «Либідь», 1997. – 544 с.
3. Беседы по автоматике / Н. И. Голубничий, Г. Ф. Зайцев и др. – К. : «Техніка», 1973. – 236 с.

# НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки  
до проведення практичних занять  
та виконання самостійної роботи  
з дисципліни

## **«СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ»**

(для студентів 3 і 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки  
0922 (6.050702) «Електромеханіка» спеціальності  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

Укладач **ШПІКА** Микола Іванович

Відповідальний за випуск *В. Х. Далека*

Редактор *О. Ю. Кригіна*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 204М

---

Підп. до друку 20.12.2010 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 2,3

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.